



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ Patentschrift  
⑩ DE 198 46 532 C 1

⑤ Int. Cl.<sup>7</sup>:  
G 02 B 27/09

⑳ Aktenzeichen: 198 46 532.7-51  
㉑ Anmeldetag: 9. 10. 1998  
㉒ Offenlegungstag: -  
㉓ Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 31. 5. 2000

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

㉔ Patentinhaber:  
Dilas Diodenlaser GmbH, 55129 Mainz, DE  
㉕ Vertreter:  
E. Tergau und Kollegen, 90482 Nürnberg

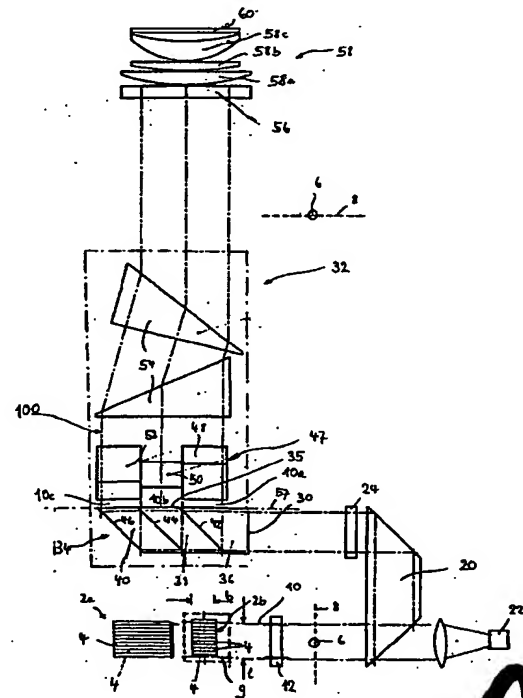
㉖ Erfinder:  
Biesenbach, Jens, Dipl.-Ing., 55126 Mainz, DE;  
Pfeffer, Frank, Dipl.-Ing., 55270 Klein-Winternheim,  
DE; Noeske, Axel, 65399 Kiedrich, DE

㉗ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

DE 195 14 626 C2  
DE 197 05 574 A1

㉘ Einrichtung zur Strahlformung eines Laserstrahls und Hochleistungs-Diodenlaser mit einer solchen  
Einrichtung

㉙ Die Erfindung bezieht sich auf eine Einrichtung zur Strahlformung eines Laserstrahls (10) mit annähernd rechteckigem Strahlquerschnitt, der in einer zur Ausbreitungsrichtung senkrechten und zu einer Seitenkante dieses Strahlquerschnitts parallelen ersten Achse (6) eine erste Strahldivergenz und zu einer dazu und zur Ausbreitungsrichtung senkrechten zweiten Achse (8) eine zweite Strahldivergenz aufweist, die kleiner ist als die erste Strahldivergenz. Gemäß der Erfindung ist im Strahlengang dieses Laserstrahls (10) eine optische Transformationseinrichtung (32) zum Aufteilen des Laserstrahls (10) in eine Mehrzahl von Teilstrahlen (10a, b, c) und erneuten Zusammensetzen der Teilstrahlen (10a, b, c) in einen Ausgangslaserstrahl (100) mit ebenfalls annähernd rechteckigem Strahlquerschnitt annähernd gleicher Fläche, dessen Länge (l/3) der Seitenkante in Richtung der ersten Achse (6) gegenüber der Länge (l) der Seitenkante des Strahlquerschnitts des Laserstrahls (10) in Richtung dieser ersten Achse (6) erniedrigt ist. Durch diese Maßnahme ist es möglich, einen rechteckigen Laserstrahl mit annähernd gleicher Strahlqualität in Richtung der beiden zueinander senkrechten Seitenkanten zu erzeugen.



AM

DE 198 46 532 C 1

DE 198 46 532 C 1

## Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf eine Einrichtung zur Strahlformung eines Laserstrahls und einen Hochleistungs-Diodenlaser, in dem eine solche Einrichtung Verwendung findet.

Für die Materialbearbeitung werden in zunehmendem Maße Hochleistungs-Diodenlaser eingesetzt. Dabei ist die am Werkstück erzielbare Intensität der limitierende Faktor für die Material- und Verfahrensauswahl. So wird beispielsweise zum Wärmeleitungsschweißen von Stahlblechen eine Intensität benötigt, die größer als  $10^4 \text{ W/cm}^2$  ist, wobei gleichzeitig dem Stahlblech eine Leistung zugeführt werden muß, die größer als 1 kW ist. Dies stellt die Leistungsgrenze derzeit verfügbarer Diodenlaser dar. Für die Anwendungen Blechschneiden und Tiefschweißen sind nun Intensitäten erforderlich, die größer als  $10^6 \text{ W/cm}^2$  sind. Die benötigten Intensitäten und Gesamtleistungen hängen außerdem von den zu bearbeitenden Materialien und deren Absorptionseigenschaften im Bereich der Diodenlaserwellenlänge von 800–980 nm ab. So kann beispielsweise Aluminiumblech aufgrund seiner geringen Absorption von etwa 12% im Vergleich zu Stahlblech mit einer Absorption von etwa 40% nur mit entsprechend höherer Leistung geschweißt werden.

Um eine hohe Leistung zu erzielen, ist es bekannt, mehrere barrenförmige Diodenlaserelemente (Diodenlaserbarren) in einem Stapel anzuordnen. Mit einer solchen Anordnung kann zwar die Gesamtleistung problemlos erhöht werden, der von einer solchen Stapelanordnung erzeugte Laserstrahl hat aber einen rechteckigen Strahlquerschnitt, dessen Strahlqualität in zueinander orthogonalen Richtungen parallel zu den Seitenkanten des Strahlquerschnitts unterschiedlich ist. Aus einem solchen Laserstrahl läßt sich jedoch bei der zur Weiterverwendung erforderlichen Fokussierung mit herkömmlichen Abbildungsoptiken nur eine ebenfalls rechteckige Fokusgeometrie erzeugen.

In einer Vielzahl von Applikationen wird der Laserstrahl über Lichtleitfasern zum Werkstück geleitet. Hierzu ist es erforderlich, den fokussierten Laserstrahl über einen Faserstecker in den Lichtleiter einzukoppeln. Durch die bei rechteckiger Geometrie des Strahlquerschnitts unvermeidliche, den runden Faserquerschnitt überstrahlende Randstrahlung, wird der Faserstecker thermisch belastet und insbesondere bei Leistungen größer 1 kW im Dauerstrichbetrieb zerstört. Zwar kann ein Laserstrahl mit einer rechteckigen Strahlgeometrie im Fokus prinzipiell auch in eine Faser eingekoppelt werden, deren Durchmesser entsprechend groß gewählt wird. Dies geht jedoch nur unter Verlust der durch den größeren Querschnitt der Lichtleitfaser bedingten maximal erzielbaren Intensität am Ausgang der Lichtleitfaser.

Aus der deutschen Patentschrift DE 195 14 626 C2 und der deutschen Offenlegungsschrift DE 197 05 574 A1 sind Einrichtungen zur Strahlformung eines von Diodenlaserelementen erzeugten Laserstrahls mit rechteckigem Strahlquerschnitt und unterschiedlicher Strahlqualität in zueinander orthogonalen Richtungen bekannt, bei denen der aus einem Laserdiodenarray austretende Laserstrahl mit Hilfe eines refraktiven optischen Elements in zueinander versetzte Teilstrahlen zerlegt oder aufgefächert wird. Die Teilstrahlen werden anschließend derart umgruppiert, daß ein Laserstrahl mit rechteckigem Querschnitt erzeugt wird, dessen Strahlqualität oder Strahlparameterprodukt in zueinander orthogonalen Richtungen parallel zu den Seitenkanten des Strahlquerschnitts annähernd gleich ist.

Der Erfindung liegt nun die Aufgabe zugrunde, eine Einrichtung zur Strahlformung eines Laserstrahls mit annähernd rechteckigem Strahlquerschnitt anzugeben, wie er beispielsweise von einem rechteckigen Diodenlaser-Array

oder Diodenlaser-Stapel erzeugt wird, mit der bei einfachem Aufbau eine für die weitere Verwendung des Laserstrahls erforderliche hohe Strahlqualität erzielt werden kann. Der Erfindung liegt außerdem die Aufgabe zugrunde, einen Hochleistungs-Diodenlaser anzugeben, dessen Ausgangslaserstrahl bei zugleich hoher Leistung und Intensität eine hohe Strahlqualität aufweist.

Die genannte Aufgabe wird gemäß der Erfindung gelöst mit den Merkmalen des Patentanspruches 1. Die Einrichtung zur Strahlformung eines Laserstrahls mit annähernd rechteckigem Strahlquerschnitt, der in einer zur Ausbreitungsrichtung senkrechten und zu einer Seitenkante dieses Strahlquerschnitts parallelen ersten Achse eine erste Strahldivergenz und zu einer dazu und zur Ausgangsrichtung senkrechten zweiten Achse eine zweite Strahldivergenz aufweist, die kleiner ist als die erste Strahldivergenz, enthält eine optische Transformationseinrichtung zum Aufteilen des Laserstrahls in eine Mehrzahl von Teilstrahlen und erneuten Zusammensetzen der Teilstrahlen in einen Ausgangslaserstrahl mit ebenfalls annähernd rechteckigem Strahlquerschnitt annähernd gleicher Fläche, dessen Länge der Seitenkante in Richtung der ersten Achse gegenüber der Länge der Seitenkante des Strahlquerschnitts des Laserstrahls in Richtung dieser ersten Achse erniedrigt ist, wobei als optische Transformationseinrichtung eine Reflexionsanordnung zum Zerlegen des Laserstrahls in zumindest zwei zueinander versetzte Teilstrahlen mit rechteckigem Querschnitt vorgesehen ist.

Durch die Verwendung einer Reflexionsanordnung, d. h. eines reflexiven optischen Elements zum Zerlegen des Laserstrahls in zueinander versetzte Teilstrahlen, ist einerseits der konstruktive Aufwand verringert, da die Aufteilung durch Reflexion erfolgt, und die Reflexionswinkel einerseits unabhängig vom Material sind, aus denen die in der Reflexionsanordnung enthaltenen optischen Elemente bestehen und andererseits fertigungstechnisch einfach zu realisierende und den Aufbau des Strahlengangs vereinfachende rechtwinklige Umlenkungen problemlos mit unter  $45^\circ$  angeordneten Spiegelflächen zu erzielen sind.

Die Erfindung beruht dabei ebenso wie die eingangs zitierten bekannten Einrichtungen auf der Überlegung, daß es möglich ist, die Strahlqualität eines Laserstrahls in einer Achse, die durch das sogenannte Strahlparameterprodukt aus der halben Breite des Strahls in dieser Achse und dem zu dieser Achse gehörenden halben Divergenzwinkel charakterisiert ist, durch Teilung und erneutes Zusammensetzen des Laserstrahls an einer dazu orthogonalen Seitenkante parallel zur anderen Achse auf Kosten der Strahlqualität in dieser anderen Achse zu verbessern.

Durch diese Maßnahme ist es nun möglich, aus einem Laserstrahl mit rechteckigem Strahlquerschnitt und unterschiedlicher Strahlqualität in zueinander orthogonalen Richtungen einen Laserstrahl mit annähernd gleicher Strahlqualität in zueinander orthogonalen Richtungen zu erzeugen. Ein Laserstrahl mit rechteckigem Strahlquerschnitt und annähernd konstanter Strahlqualität in zueinander und zur Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls senkrechten Richtungen kann nun mit Hilfe einfacher Abbildungsoptiken problemlos in einen Laserstrahl mit annähernd quadratischer Fokusgeometrie, d. h. quadratischem Strahlquerschnitt im Fokus, abgebildet werden.

Dies ist insbesondere für die Materialbearbeitung von Vorteil, da in diesem Fall das Bearbeitungsergebnis, beispielsweise beim Schweißen, unabhängig von der Richtung ist, in die der fokussierte Laserstrahl über das Werkstück bewegt wird. Bei anderer Fokusgeometrie werden bei Freiformkonturen je nach Orientierung dieser Vorschubrichtung zum Laserfokus unterschiedliche Bearbeitungsbreiten er-

zeugt und damit auch abweichende Prozeßparameter erforderlich, die bei jeder Richtungsänderung nachgeregelt werden müssen. Durch eine quadratische Fokusgeometrie des Laserstrahls ist es nun möglich, diesen mit geringen Verlusten in den in der Regel kreisrunden Querschnitt einer Lichtleitfaser einzukoppeln. Mit anderen Worten: Bei der Einkopplung eines Laserstrahls ist eine in zueinander orthogonalen Richtungen gleich große numerische Apertur von Vorteil, da auf diese Weise die numerische Apertur der Faser, die für alle Eintrittswinkel bei Rotation um die Längsachse identisch ist, vollständig ausgenutzt werden kann. Dadurch wird ein Verlust an Strahlqualität vermieden, der entsteht, wenn die numerische Apertur der Faser der jeweils größeren numerischen Apertur eines rechteckigen Fokus angepaßt sein muß.

In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist eine Reflexionsanordnung vorgesehen, bei der die Teilstrahlen mit rechteckigem Querschnitt an einem Eckpunkt dieses Querschnitts aneinander stoßen, wobei der Reflexionsanordnung eine Ablenkeinrichtung zum Versetzen zumindest eines der beiden Teilstrahlungen in Richtung der ersten Achse nachgeordnet ist.

Vorzugsweise enthält die Reflexionsanordnung eine Mehrzahl versetzt zueinander angeordnete Umlenkprismen.

In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist als Ablenkeinrichtung eine der Anzahl der Teilstrahlen entsprechende Anzahl von Planparallelplatten vorgesehen.

In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform ist der Ablenkeinrichtung ein anamorphotisches Prismenpaar zur Kompression der Strahlapertur oder Strahlbreite in Richtung der zweiten Achse nachgeordnet.

Zur Erzeugung eines im wesentlichen quadratischen Strahlquerschnittes ist der Transformationseinrichtung vorzugsweise eine Zylinderlinse nachgeordnet, deren Zylinderachse zur ersten Achse parallel ist, und die insbesondere derart angeordnet ist, daß die Austrittsfläche der Reflexionsanordnung im Linienfokus der Zylinderlinse liegt. Durch diese Maßnahme kann bei entsprechender Auswahl der Brennweite der Zylinderlinse ein annähernd quadratischer Ausgangslaserstrahl mit annähernd gleicher Strahldivergenz in beiden Achsen erzeugt werden.

Die zweitgenannte Aufgabe wird gemäß der Erfindung gelöst mit den Merkmalen des Patentanspruches 8. Ein Hochleistungs-Diodenlaser umfaßt hierzu zumindest zwei erste Laserstapel, die jeweils eine Vielzahl von übereinander in einen gegenseitigen Mittenabstand angeordneten Laserbarren enthalten und zueinander um den halben Mittenabstand versetzt angeordnet sind, wobei den ersten Laserstapeln eine erste Strahlteileranordnung zum Zusammensetzen der aus den ersten Laserstapeln auf jeweils austretenden streifenförmigen ersten Laserstrahlen und zum Erzeugen eines zusammengesetzten ersten Laserstrahls mit rechteckigem Querschnitt zugeordnet ist, wobei der Strahlteileranordnung eine Einrichtung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche nachgeordnet ist. Durch diese Maßnahme ist es möglich, einen Laserstrahl mit rechteckigem Querschnitt und annähernd homogener Intensität innerhalb dieses Querschnitts zu erzeugen.

Vorzugsweise enthält die Strahlteileranordnung zum Zusammensetzen der beiden streifenförmigen ersten Laserstrahlen eine Planparallelplatte, durch die der Laserstrahl eines Laserstapels hindurchtritt, und die an einer ihrer Flächen mit einer streifenförmigen reflektierenden Schicht versehen ist, die den Laserstrahl des anderen Laserstapels reflektiert.

In einer alternativen Ausgestaltung der Erfindung enthält die Strahlteileranordnung einen Prismenstapel, der aus einer

der Anzahl der Diodenlaserbarren 4 eines Laserstapels entsprechenden Anzahl voneinander beabstandet angeordneter Prismen besteht.

In einer besonders bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung enthält der Hochleistungs-Diodenlaser zwei zweite Laserstapel und eine diesen zugeordnete zweite Strahlteileranordnung zum Zusammensetzen der aus den zweiten Laserstapeln jeweils austretenden streifenförmigen zweiten Laserstrahlen, wobei die Polarisations Ebenen der ersten und zweiten zusammengesetzten Laserstrahlen senkrecht aufeinander stehen und im Strahlengang des ersten und zweiten zusammengesetzten Laserstrahls ein optisches Koppellement zum Überlagern dieser Laserstrahlen angeordnet ist. Dadurch kann die Leistung des Hochleistungs-Diodenlasers verdoppelt werden.

Insbesondere ist als optisches Koppellement eine Brewsterplatte vorgesehen, die den zusammengesetzten ersten Laserstrahl transmittiert und den zusammengesetzten zweiten Laserstrahl im Brewsterwinkel reflektiert.

In einer alternativen Ausführungsform ist als optisches Koppellement ein Polarisationsstrahlteiler vorgesehen.

In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung sind die, die aus den Diodenlaserbarren der ersten und zweiten Laserstapel austretenden Laserstrahlen parallel zueinander linear polarisiert, wobei im Strahlengang des ersten oder zweiten zusammengesetzten Laserstrahls eine  $\lambda/2$ -Platte angeordnet ist.

In einer besonders bevorzugten Ausführungsform sind die aus den Diodenlaserbarren der ersten und zweiten Laserstapel austretenden Laserstrahlen senkrecht zueinander linear polarisiert. Dadurch kann eine zusätzliche Einrichtung zum Drehen der Polarisations Ebene der Laserstrahlen eines der beiden Laserstapel entfallen.

Zur weiteren Erläuterung der Erfindung wird auf die Ausführungsbeispiele der Zeichnung verwiesen. Es zeigen:

Fig. 1 einen Hochleistungs-Diodenlaser mit einer Einrichtung gemäß der Erfindung,

Fig. 2 u. 3 jeweils einen Teil der Einrichtung in einer perspektivischen Darstellung,

Fig. 4 eine besonders vorteilhafte Anordnung der Laserstapel eines Hochleistungs-Diodenlasers,

Fig. 5 u. 6 jeweils Ausführungsformen einer Strahlteileranordnung zum Zusammenfügen der aus zwei Laserstapeln austretenden Laserstrahlen.

Gemäß Fig. 1 enthält ein Hochleistungs-Diodenlaser zumindest zwei erste Laserstacks oder Laserstapel 2a, b, die jeweils aus mehreren, beispielsweise 5 bis 20 senkrecht zu ihrer Längsachse oder ersten Achse 6 (slow axis, senkrecht zur Zeichenebene) übereinander angeordneten jeweils etwa 10 mm langen linearen Laserdioden-Arrays (Diodenlaserbarren) 4, aufgebaut sind. Die Diodenlaserbarren 4 sind jeweils auf einen Mikrokühler aus Kupfer angeordnet, der im materialschlüssig gestapelten Zustand einen wasserdurchströmten Kühler bildet. Auf diese Weise ergibt sich für den Stapelaufbau ein Rastermaß von etwa 1,8 mm. Die einzelnen Diodenlaserbarren 4 sind außerdem jeweils mit einer Zylinder-Mikrooptik versehen, mit der der aus den einzelnen Diodenlaserbarren 4 austretende schmale Laserstrahl in der senkrecht zur ersten Achse 6 verlaufenden Stapelachse oder zweiten Achse 8 (fast axis) auf eine Strahlhöhe von etwa 0,8 mm kollimiert wird und in dieser zweiten Achse 8 eine niedrige zweite Strahldivergenz aufweist. In der dazu senkrechten ersten Achse 6 ist der Laserstrahl nicht kollimiert und weist in Richtung dieser Achse 6, d. h. senkrecht zur Zeichenebene, eine hohe erste Strahldivergenz von insgesamt etwa  $10^\circ$  auf.

Da die Höhe des kollimierten Laserstrahls etwa 0,8 mm beträgt, der Laserstapel 2a, 2b jedoch ein Rastermaß (Mit-

tenabstand der einander benachbarten Diodenlaserbarren 4 in Stapelrichtung) von etwa 1,8 mm aufweist, bilden sich zwischen den einzelnen schmalen Laserstrahlen Zwischenräume von etwa 1 mm aus. Zum Auffüllen dieser Zwischenräume werden die von den beiden ersten Laserstapel 2a, 2b erzeugten streifenförmigen Laserstrahlen überlagert. Hierzu sind die beiden ersten Laserstapel 2a, 2b in Richtung zur ersten Achse 6 um das halbe Rastermaß versetzt nebeneinander angeordnet.

Im Ausführungsbeispiel breiten sich die aus den ersten Laserstapeln 2a, 2b jeweils austretenden Laserstrahlen unter einem Winkel von 90° zueinander aus und werden mit einer in der Figur gestrichelt eingezeichneten ersten Strahlteileranordnung 9a zu einem ersten Laserstrahl 10 mit rechteckförmigem Querschnitt und annähernd konstanter Intensität über die Querschnittsfläche zusammengefügt, dessen Breite b der Summe aus der Länge der Laserbarren 4 und dem Produkt aus Abstand und Divergenzwinkel und dessen Länge l der Höhe des Laserstapels 2a, b entspricht. Die erste Strahlteileranordnung 9a besteht hierzu aus einer unter 45° angeordneten Planparallelplatte, die an einer ihrer Reflexionsflächen im Rastermaß der Laserstapel 2a, 2b mit einer streifenförmigen reflektierenden Schicht versehen ist, so daß die vom Laserstapel 2a erzeugten Laserstrahlen durchgelassen und die vom Laserstapel 2b erzeugten Laserstrahlen reflektiert werden.

Der auf diese Weise erzeugte erste Laserstrahl 101 hat einen rechteckigen Querschnitt, wobei die erste Strahldivergenz in Richtung der zur Zeichenebene senkrechten Seitenkante dieses Querschnitts, d. h. in Richtung der ersten Achse 6 größer ist als die zweite Strahldivergenz in Richtung der dazu senkrechten Seitenkante (zweite Achse 8). Zur Kollimation des weiteren Strahlenganges ist deshalb eine erste Zylinderlinse 12a vorgesehen, die den Laserstrahl 101 in dieser Achse 6 kollimiert. Der kollimierte Laserstrahl 10 wird in einem Umlenkprisma 20 um 180° umgelenkt, um die für die optische Abbildung erforderliche Weglänge in einem kompakten Gehäuse realisieren zu können.

Insbesondere kann an den unter 45° zur Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls 10 stehenden reflektierenden Flächen des Prismas 20 durch geeignete Beschichtung eine teilweise Strahlauskopplung bewirkt werden, die eine Messung der Leistung mittels eines Lichtempfängers 22 ermöglicht.

Am Ausgang des Umlenkprismas 20 ist eine zylindrische Fokussierlinse 24 angeordnet, die zur Fokussierung des Laserstrahls 10 in der ersten Achse 6 vorgesehen ist und diesen auf die Eingangsfläche 30 einer Transformationseinrichtung 32 abbildet.

Die Transformationseinrichtung 32 enthält eine Reflexionsanordnung 34, die aus drei Prismen 36, 38, 40 besteht, deren Reflexionsflächen 42, 44, 46 versetzt zueinander angeordnet sind, so daß der auf die Reflexionsanordnung 34 auftreffende Laserstrahl 10 in drei Teilstrahlen 10a, b, c mit jeweils rechteckigem Querschnitt zerlegt wird, wobei benachbarte Teilstrahlen 10a, b, 10b, c jeweils an einer Ecke zusammenstoßen. Die drei Teilstrahlen 10a, b, c treten aus einer Austrittsfläche 35 der Reflexionsanordnung 34 aus und gelangen in eine dieser nachgeordnete Ablenkeinrichtung 47, die drei Planparallelplatten 48, 50, 52 enthält. Jedem Umlenkprisma 36, 38, 40 ist dabei eine Planparallelplatte 48, 50, 52 zugeordnet, die im Ausführungsbeispiel einen Versatz der äußeren Teilstrahlen 10a, c senkrecht zur Zeichenebene bewirkt. Die drei Teilstrahlen 10a, b, c am Austritt der Reflexionsanordnung 34 werden somit durch geeignete Verdrehung der Planparallelplatten 48, 50, 52 aneinander gereiht und bilden einen Ausgangslaserstrahl 100 mit geschlossenem Rechteckquerschnitt.

Der Ausgangslaserstrahl 100 wird im Ausführungsbei-

spiel somit in Richtung der zweiten Achse 8 verbreitert. Da die Querschnittsfläche annähernd konstant bleibt, führt dies in Richtung der dazu senkrechten ersten Achse 6 zu einer Verringerung der Strahlbreite. Im Ausführungsbeispiel wird somit ein Laserstrahl mit einem Querschnitt von  $10 \times 20 \text{ mm}^2$  in einen Ausgangslaserstrahl mit einem etwa flächengleichen Querschnitt von etwa  $3,3 \times 60 \text{ mm}^2$  umgewandelt. Der Laserstrahl 10 wird gewissermaßen parallel zu einer Seitenkante in Teilrechtecke zerlegt und an den dazu senkrechten Seitenkanten erneut zu einem zusammenhängenden Rechteck zusammengefügt. Die Reflexionsanordnung 34 wirkt dabei zugleich als Lichtleiter, so daß in ihr keine Aufweitung des Laserstrahls erfolgen kann.

Mit dieser rein geometrischen Umordnung ist auch eine Transformation der Strahlqualität verbunden. Die Strahlqualität in Richtung der ersten Achse 6, d. h. in Richtung der Seitenkante des Querschnitts, in der der Laserstrahl 10 eine hohe Strahldivergenz hat, wird durch diese Drittelung der Breite um den Faktor 3 verbessert und die Strahlqualität in der zweiten Achse 8 durch die Verdreifachung der Länge um den Faktor 3 verschlechtert. Als Maß für die Strahlqualität dient dabei das Strahlparameterprodukt, das als Produkt aus der halben Strahlapertur und dem halben Divergenzwinkel definiert ist. Je kleiner dieses Strahlparameterprodukt ist, desto besser ist auch die Strahlqualität. Dabei ist zu beachten, daß die im Strahlengang des Laserstrahls 10 bzw. 100 angeordneten optischen Abbildungselemente, wie beispielsweise die Zylinderlinsen 12 und 24 trotz Kollimation keinen wesentlichen Einfluß auf das Strahlparameterprodukt haben. Dieses bleibt im Idealfall beim Durchgang durch sogenannte lineare optische Abbildungselemente konstant und wird in der Praxis sogar schlechter, so daß Kollimationen oder Fokussierungen prinzipiell nicht geeignet sind, das Strahlparameterprodukt zu beeinflussen und die Strahlqualität zu verbessern.

Im Ausführungsbeispiel hat nun der aus den Laserstapeln 2a, b austretende Laserstrahl ein Strahlparameterprodukt in Richtung der ersten Achse 6 von  $450 \text{ mm} \times \text{mrad}$  und in Richtung der zweiten Achse 8 von  $60 \text{ mm} \times \text{mrad}$ . Durch die Aufweitung des Strahlquerschnitts in Richtung der zweiten Achse 8 um den Faktor 3 wird somit das Strahlparameterprodukt auf  $180 \text{ mm} \times \text{mrad}$  erhöht. In Richtung der ersten Achse 6 wird das Strahlparameterprodukt dagegen auf  $170 \text{ mm} \times \text{mrad}$  verringert. Diese in beiden Achsen 6, 8 nahezu gleiche Strahlqualität erlaubt die Kopplung des Ausgangslaserstrahls 100 in eine Lichtleitfaser mit einem Radius von  $800 \mu\text{m}$ , wogegen mit dem Laserstrahl 10 am Eingang 30 der Transformationseinrichtung 32 allenfalls eine Kopplung in eine Lichtleitfaser mit dem Radius von  $2200 \mu\text{m}$  möglich wäre.

Den Planparallelplatten 48, 50, 52 ist ein anamorphotisches Prismenpaar 54 nachgeordnet, die den Strahlquerschnitt in Richtung der zweiten Achse 8 für die nachfolgende Abbildungsoptik komprimiert. Der auf diese Weise komprimierte Ausgangslaserstrahl 100 wird zunächst in Richtung der ersten Achse 6 mit Hilfe einer Zylinderlinse 56 kollimiert, deren Linienfokus 57 an der Austrittsfläche 35 der Reflexionsanordnung 34 angeordnet ist.

In einer nachgeschalteten rotationssymmetrischen Fokussieroptik 58, die aus mehreren hintereinander geschalteten Linsen 58a, b, c aufgebaut ist, wird der kollimierte Ausgangslaserstrahl 100 fokussiert. Die Verwendung mehrerer Linsen 58a, b, c ist erforderlich, um bei einem Durchmesser von etwa 60 mm eine möglichst kleine Brennweite, im Beispiel etwa 50 mm, und damit einen möglichst geringen Fokusquerschnitt, im Beispiel etwa  $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$ , zu erhalten. Die ausgangsseitige Linse 58c ist außerdem mit einem Schutzglas 60 versehen. Alle optischen Elemente im Strah-

Strahlengang sind außerdem an ihren Grenzflächen, durch die der Laserstrahl hindurchtritt, mit einer antireflektierenden Schicht beschichtet.

Der Strahlengang innerhalb der Transformationseinrichtung 32 ist in der perspektivischen Darstellung gemäß Fig. 2 näher veranschaulicht. Der Laserstrahl 10 mit senkrecht zur Strahlachse rechteckigem Querschnitt der Breite  $b$  und der Länge  $l$  wird in den drei Umlenkprismen 36, 42, 44 um  $90^\circ$  umgelenkt und in drei Teilstrahlen 10a, b, c zerlegt, die an ihren Eckpunkten aneinander stoßen. In der Figur ist gestrichelt angedeutet, daß der Laserstrahl 10 in Richtung der Seitenkante mit der Länge  $l$  (erste Achse 6) eine hohe erste Strahldivergenz  $\theta_1$  und in Richtung der Seitenkante mit der Länge  $b$  (zweite Achse 8) eine niedrige zweite Strahldivergenz  $\theta_2$  hat, wobei aus Gründen der Übersichtlichkeit der zeichnerischen Darstellung die in der Transformationseinrichtung erfolgende Strahlformung anhand von idealen nichtdivergenten Strahlenbündeln dargestellt werden.

Mit Hilfe der Planparallelplatten 48 und 52 werden anschließend die beiden äußeren Teilstrahlen 10a, c derart versetzt, daß sie gemeinsam mit dem mittleren Teilstrahl 10b einen Ausgangslaserstrahl 100 bilden, dessen Querschnitt erneut die Form eines geschlossenen Rechteckes mit der Länge  $3b$  und der Breite  $l/3$  hat. Die in der Figur dargestellten einzelnen Umlenkprismen 36, 38, 40 können auch einstückig aus einem Körper hergestellt sein. Ebenso kann auch im Strahlengang des mittleren Teilstrahls 10b eine in Fig. 1 eingezeichnete Planparallelplatte 50 angeordnet sein, deren Flächen dann senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Teilstrahls 10b orientiert sind.

In der Figur ist nun zu erkennen, daß der Laserstrahl 10 in Richtung der ersten Achse 6 um einen Faktor 3 verschmälert und in Richtung der zweiten Achse 8 um einen Faktor 3 bei in beiden Achsen 6, 8 jeweils konstant bleibender Strahldivergenz verbreitert wird.

Die relativ hohe Strahldivergenz in Richtung der ersten Achse 6 wird nun gemäß Fig. 3 mit der Zylinderlinse 56 kollimiert. Die Brennweite der Zylinderlinse 56 ist dabei so eingestellt, daß der Laserstrahl 100 am Ort der Zylinderlinse 56 annähernd quadratischen Querschnitt aufweist. Dies geschieht dadurch, daß einerseits der Konvergenzpunkt der divergenten Randstrahlen 100a, b annähernd auf dem Linienfokus 57 der Zylinderlinse 56 liegt und andererseits die Brennweite so gewählt wird, daß am Ort der Zylinderlinse 56 die Breite des sich in Richtung der ersten Achse 6 wegen seiner hohen Divergenz in dieser Achse stärker als in der zweiten Achse 8 aufweitenden Ausgangslaserstrahls 100 annähernd gleich der Länge des Ausgangslaserstrahls 100 in Richtung der zweiten Achse 8 ist. In der Praxis liegt der Linienfokus 57 in der Ebene der Austrittsfläche 35 der Reflexionsanordnung 34.

In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung gemäß Fig. 4 sind den beiden ersten Laserstapeln 2a, 2b zwei zweite Laserstapel 2c, 2d zugeordnet, mit denen die Gesamtleistung des Hochleistungs-Diodenlasers verdoppelt werden kann. Im Strahlengang des von den zweiten Laserstapeln 2c, 2d erzeugten zweiten Laserstrahls 102 ist eine zweite Strahlteileranordnung 9b angeordnet, mit der die linear polarisierten aus den Laserdioden der Laserstapel 2c und 2d austretenden streifenförmigen zweiten Laserstrahlen ebenfalls nahtlos zusammengesetzt werden. Im Strahlengang des zweiten Laserstrahls 102 ist außerdem eine  $\lambda/2$ -Platte 70 angeordnet, mit der die Polarisationssebene des zweiten Laserstrahls um  $90^\circ$  gedreht wird. In dieser Ausgestaltung haben die ersten und zweiten Laserstapel 2a, b, c, d identischen Aufbau. Alternativ hierzu können jedoch für die zweiten Laserstapel 2c, 2d auch Laserbarren eingesetzt werden, die linear polarisiertes Laserlicht emittieren, dessen Polarisationssebene ge-

genüber der Polarisationssebene des von den ersten Laserstapeln 2a, b emittierten linear polarisierten Laserlichts um  $90^\circ$  gedreht ist. In diesem Fall ist eine Phasenschieberplatte nicht erforderlich.

Eine Zylinderlinse 12b dient zur Kollimation des in Richtung der ersten Achse 6 divergenten zweiten Laserstrahls. Im Strahlengang des ersten Laserstrahls 101 und im Strahlengang des zweiten Laserstrahls 102 ist ein Koppellement 72, beispielsweise wie in der Figur dargestellt, eine unter dem Brewsterwinkel angeordnete Planparallelplatte oder alternativ hierzu ein Polarisationsstrahlteiler, angeordnet, das den parallel zur Zeichenebene polarisierten ersten Laserstrahl 101 transmittiert und den senkrecht zur Zeichenebene polarisierten zweiten Laserstrahl 102 reflektiert, so daß beide Laserstrahlen übereinander gelagert werden.

In der Draufsicht gemäß Fig. 5 ist zu erkennen, daß eine Reflexionsfläche der Strahlteileranordnung 9a, b mit einer streifenförmigen reflektierenden Schicht 90 versehen ist, deren Streifen eine zumindest der Höhe eines aus einem einzelnen Diodenlaserbarren austretenden Laserstrahls entsprechende Breite aufweisen und dem Rastermaß des Laserstapels entsprechend voneinander beabstandet angeordnet sind.

Alternativ kann als Strahlteileranordnung 9a, b auch gemäß Fig. 6 ein aus einer der Anzahl der Diodenlaserbarren entsprechender Anzahl von in einem Stapel angeordneten Umlenkprismen 92 vorgesehen sein, die den Laserstrahl eines der Laserstapel durch interne Totalreflexion umlenken. Der Laserstrahl des anderen Laserstapels tritt durch den zwischen den Umlenkprismen 92 befindlichen Zwischenraum hindurch.

In einer weiteren alternativen Anordnung ist es auch möglich als Strahlteileranordnung 9a, b einen dichroitischen Spiegel zu verwenden. In diesem Fall müssen die aus den Laserstapeln 2a, c austretenden Laserstrahlen und die aus den Laserstapeln 2b, d austretenden Laserstrahlen unterschiedliche Wellenlänge haben. Dies läßt sich mit dem bei handelsüblichen Diodenlasern verfügbaren Wellenlängenbereich zwischen 800 nm und 980 nm technisch problemlos realisieren.

#### Patentansprüche

1. Einrichtung zur Strahlformung eines Laserstrahls (10) mit annähernd rechteckigem Strahlquerschnitt, der in einer zur Ausbreitungsrichtung senkrechten und zu einer Seitenkante dieses Strahlquerschnitts parallelen ersten Achse (6) eine erste Strahldivergenz und zu einer dazu und zur Ausbreitungsrichtung senkrechten zweiten Achse (8) eine zweite Strahldivergenz aufweist, die kleiner ist als die erste Strahldivergenz, gekennzeichnet durch eine optische Transformationseinrichtung (32) zum Aufteilen des Laserstrahls (10) in eine Mehrzahl von Teilstrahlen (10a, b, c) und erneuten Zusammensetzen der Teilstrahlen (10a, b, c) in einen Ausgangslaserstrahl (100) mit ebenfalls annähernd rechteckigem Strahlquerschnitt annähernd gleicher Fläche, dessen Länge ( $l/3$ ) der Seitenkante in Richtung der ersten Achse (6) gegenüber der Länge ( $l$ ) der Seitenkante des Strahlquerschnitts des Laserstrahls (10) in Richtung dieser ersten Achse (6) erniedrigt ist, wobei die optische Transformationseinrichtung (32) eine Reflexionsanordnung (34) zum Zerlegen des Laserstrahls (10) in zumindest zwei zueinander versetzte Teilstrahlen (10a, b, c) mit rechteckigem Querschnitt enthält.
2. Einrichtung nach Anspruch 1, bei der die von der Reflexionsanordnung (34) erzeugten, zueinander versetzten Teilstrahlen (10a, b, c) mit rechteckigem Querschnitt an einem Eckpunkt dieses Querschnitts anein-



anderstoßen, wobei der Reflexionsanordnung (34) eine Ablenkeinrichtung (48, 50, 52) zum Versetzen zumindest eines der Teilstrahlen (10a, c) in Richtung der ersten Achse (6) nachgeordnet ist.

3. Einrichtung nach Anspruch 1 oder 2, bei der die Reflexionsanordnung (34) eine Mehrzahl versetzt zueinander angeordneter Umlenkprismen (36, 38, 40) enthält.

4. Einrichtung nach Anspruch 2 oder 3, bei der als Ablenkeinrichtung eine der Anzahl der Teilstrahlen entsprechende Anzahl von Planparallelplatten (48, 50, 52) vorgesehen sind.

5. Einrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 4, bei der der Ablenkeinrichtung ein anamorphotisches Prismenpaar (54) zur Kompression der Strahlbreite in Richtung der zweiten Achse (8) nachgeordnet ist.

6. Einrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der der Transformationseinrichtung (32) eine Zylinderlinse (56) nachgeordnet ist, deren Zylinderachse zur ersten Achse (6) parallel ist.

7. Einrichtung nach Anspruch 6, bei der die Austrittsfläche (35) der Reflexionsanordnung (34) wenigstens annähernd im Linienfokus (62) der Zylinderlinse (56) angeordnet ist.

8. Hochleistungs-Diodenlaser mit einer Einrichtung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, mit zumindest zwei ersten Laserstapeln (2a, b), die jeweils eine Vielzahl von übereinander in einem gegenseitigen Mittenabstand angeordneten Diodenlaserbarren (4) enthalten und zueinander um den halben Mittenabstand versetzt angeordnet sind, wobei den ersten Laserstapeln (2a, b) eine erste Strahlteileranordnung (9a) zum Zusammensetzen der aus den ersten Laserstapeln (2a, b) jeweils austretenden streifenförmigen ersten Laserstrahlen und zum Erzeugen eines zusammengesetzten ersten Laserstrahles (101) mit rechteckigem Querschnitt zugeordnet ist.

9. Hochleistungs-Diodenlaser nach Anspruch 8, bei dem die Strahlteileranordnung (9a, b) zum Zusammensetzen der beiden streifenförmigen ersten Laserstrahlen eine Planparallelplatte enthält, die an einer ihrer Flachseiten mit einer streifenförmigen reflektierenden Schicht (90) versehen ist, und durch die der Laserstrahl eines Laserstapels (2a, c) hindurchtritt und der Laserstrahl des anderen Laserstapels (2b, d) reflektiert wird.

10. Hochleistungs-Diodenlaser nach Anspruch 8, bei dem die Strahlteileranordnung (9a, b) einen Prismenstapel enthält, der aus einer der Anzahl der Diodenlaserbarren (4) eines Laserstapels (2b, d) entsprechenden Anzahl voneinander beabstandet angeordneter Prismen (92) besteht.

11. Hochleistungs-Diodenlaser nach einem der Ansprüche 8 bis 10, mit zwei zweiten Laserstapeln (2c, d) und einer diesen zugeordneten zweiten Strahlteileranordnung (9b) zum Zusammensetzen der aus den zweiten Laserstapeln (2c, d) jeweils austretenden streifenförmigen zweiten Laserstrahlen, wobei die Polarisationssebenen der ersten und zweiten zusammengesetzten Laserstrahlen (101, 102) senkrecht aufeinander stehen, und mit einem im Strahlengang des ersten und zweiten zusammengesetzten Laserstrahls (101, 102) angeordneten optischen Koppelement (72) zum Überlagern dieser Laserstrahlen (101, 102).

12. Hochleistungs-Diodenlaser nach Anspruch 11, bei dem als optisches Koppelement (72) eine Brewsterplatte vorgesehen ist, die den zusammengesetzten ersten Laserstrahl (101) transmittiert und den zusammengesetzten zweiten Laserstrahl (102) im Brewsterwinkel

reflektiert.

13. Hochleistungs-Diodenlaser nach Anspruch 11, bei dem als optisches Koppelement (72) ein Polarisationsstrahlteiler vorgesehen ist.

14. Hochleistungs-Diodenlaser nach einem der Ansprüche 11 bis 13, bei dem die aus dem Diodenlaserbarren (4) der ersten und zweiten Laserstapel (2a, b bzw. 2c, d) austretenden Laserstrahlen senkrecht zueinander linear polarisiert sind.

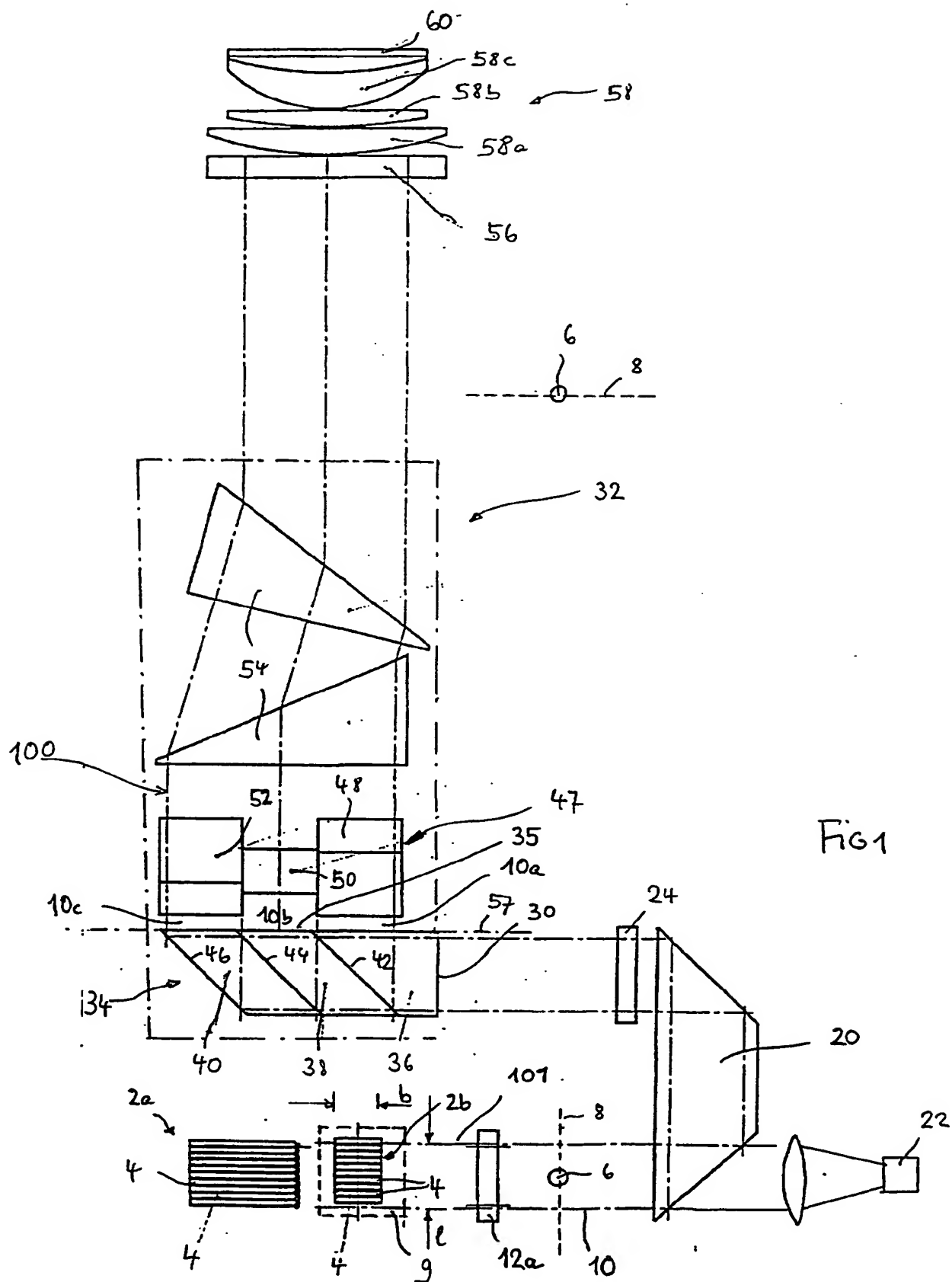
15. Hochleistungslaser nach einem der Ansprüche 11 bis 13, bei dem die aus dem Diodenlaserbarren (4) der ersten und zweiten Laserstapel (2c, b bzw. 2b, d) austretenden Laserstrahlen parallel ineinander linear polarisiert sind, wobei im Strahlengang des ersten oder zweiten zusammengesetzten Laserstrahles (101, 102) eine  $\lambda/2$ -Platte (70) angeordnet ist.

---

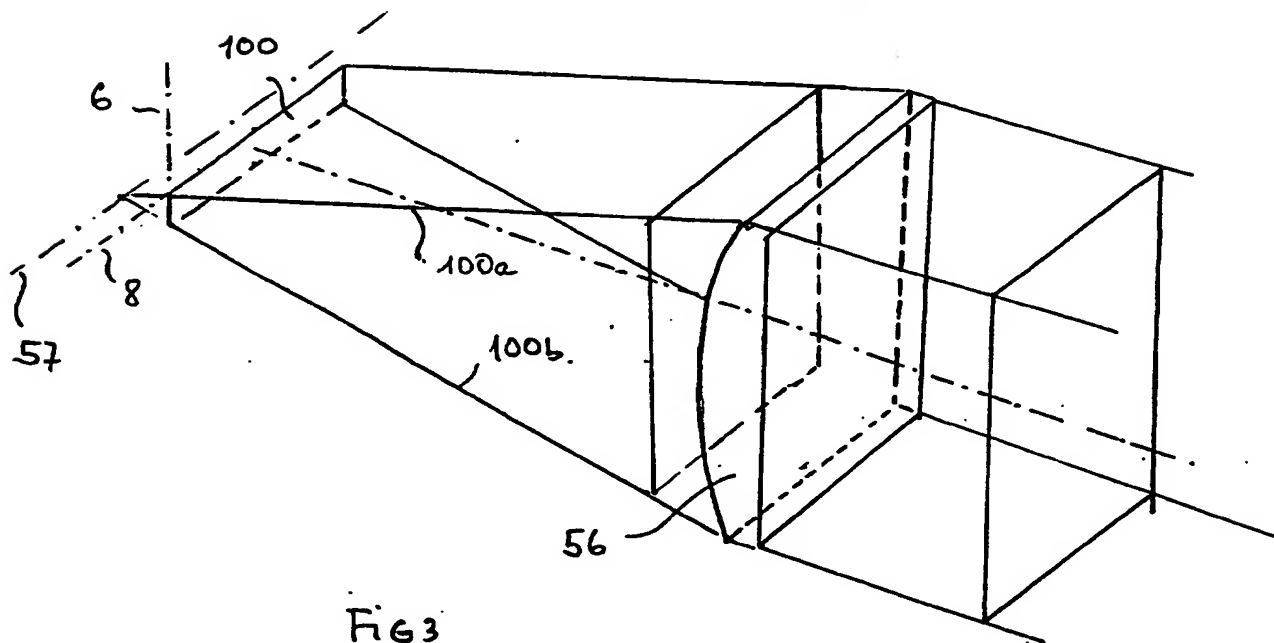
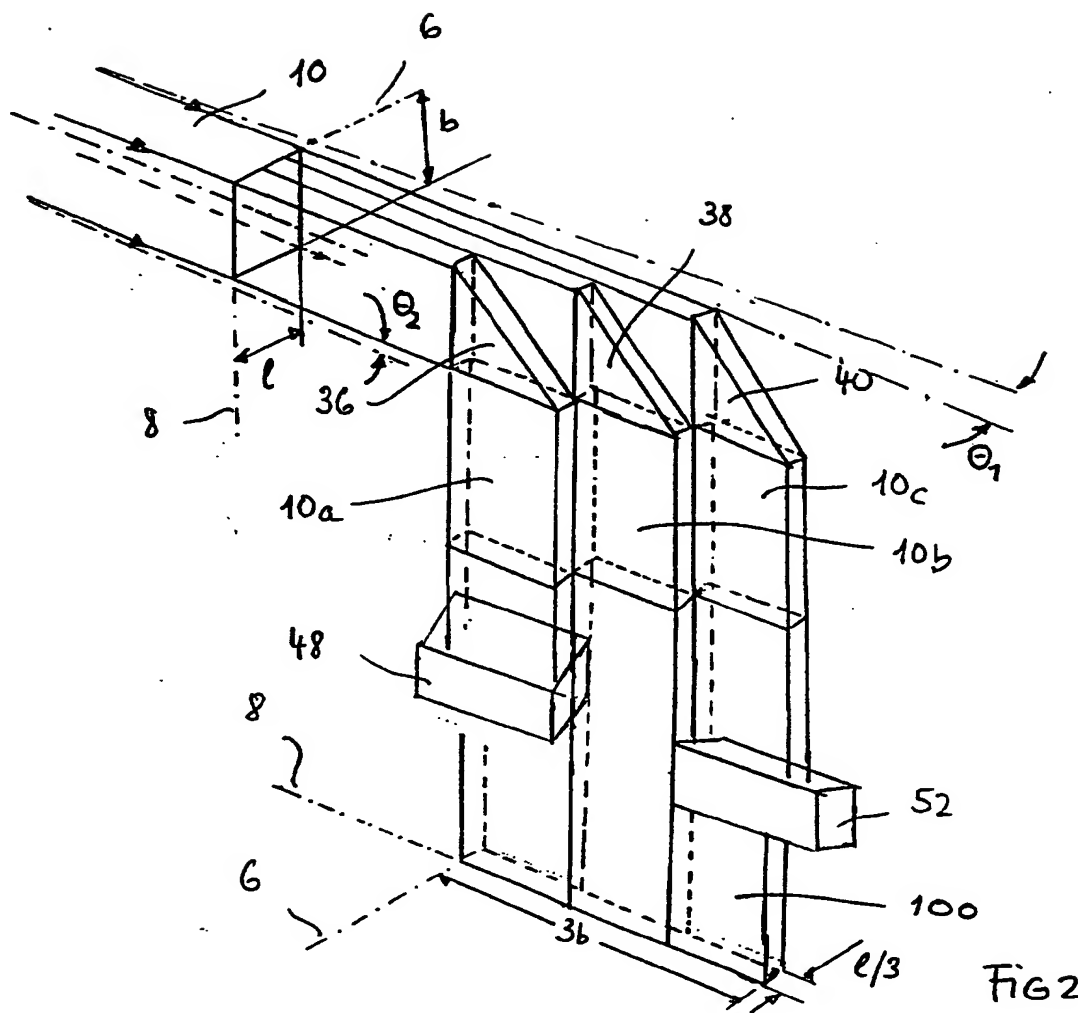
Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

---

- Leerseite -







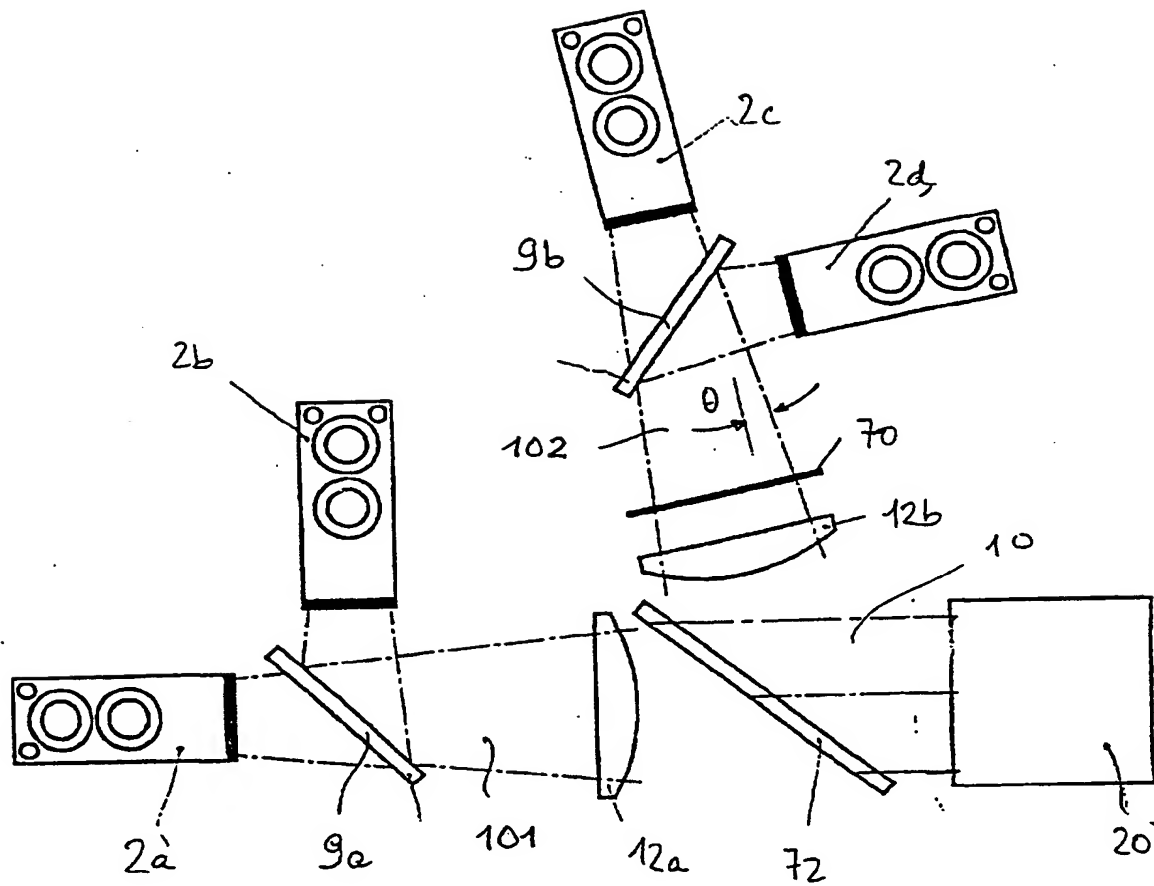


Fig. 4

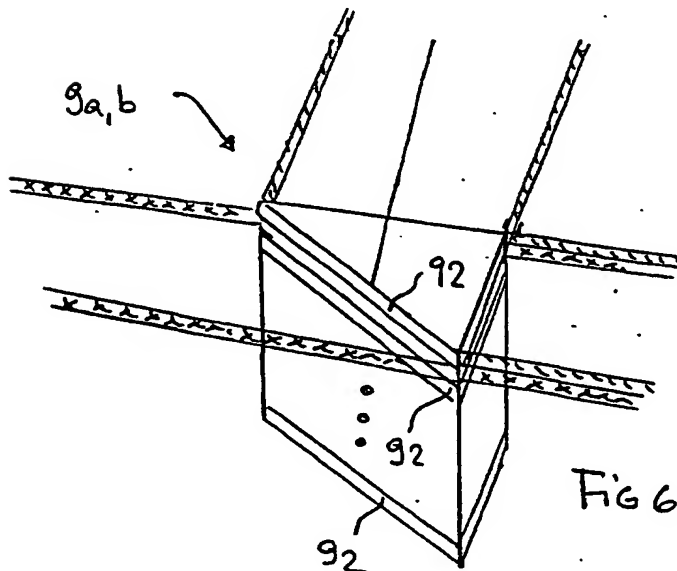


Fig. 6

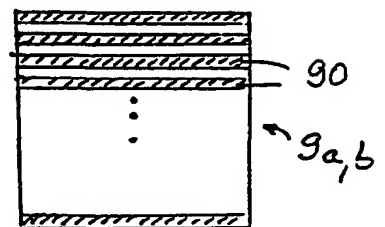


Fig. 5